

УДК 556.18

[DOI: 10.46698/VNC.2023.35.64.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.35.64.001)

Оригинальная статья

Геоинформационный анализ современных изменений гидрографических характеристик речной сети на Азово-Кубанской равнине (бассейн реки Ея)

А.В. Погорелов¹, **Д.А. Липилин**^{1, 2}, **Е.В. Яроцкая**²

¹Кубанский государственный университет, Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149;

²Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Россия, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, e-mail: LipiLin_dmitrii@mail.ru

Статья поступила: 09.05.2023, доработана: 06.06.2023, одобрена к публикации: 13.06.2023

Резюме: Актуальность работы. На земли сельскохозяйственного назначения в Краснодарском крае приходится 62% территории, большая часть которой расположена на Азово-Кубанской равнине в бассейнах степных рек. Техногенная трансформация ландшафтов и речных систем Азово-Кубанской равнины происходит непрерывно, сопровождаясь изменениями гидрографических характеристик и нарушениями дренированности территории. Указанная трансформация и связанные с ней водно-балансовые изменения до сих пор остаются слабоизученными. **Цель исследования.** Количественная оценка и анализ происходящих преобразований водно-эрозионной сети на Азово-Кубанской равнине в бассейне р. Ея с использованием распространенных гидрографических характеристик. **Методы исследования.** При цифровом моделировании на базе глобальной ЦМР ASTER/GDEM сети постоянных и временных водотоков, а также контуров водосборов реализован принятый в гидрологии и геомоделировании бассейновый подход. Распознавание типов землепользования (сельскохозяйственные угодья, населенные пункты, водные объекты, болота и лесополосы) и элементов речной сети в бассейне р. Ея выполнено по данным спутниковых снимков Landsat за период 1999–2021 гг. Дешифрирование спутниковых изображений, моделирование речной сети, картографирование и анализ пространственных данных проведены в среде полнофункциональной ГИС. Операционные территориальные единицы – частные речные бассейны в количестве 29 площадью от 70 до 609 км². **Результаты работы.** Выполненные исследования позволили оценить динамику типов землепользования и гидрографических показателей (длина водотоков, густота эрозионной сети, распаханность и урбанизированность водосборов) в бассейне р. Ея на площади 8654 км². Преобразования гидрографической сети проявляются в повсеместном сокращении длины водотоков и уменьшении плотности водно-эрозионной сети. В каждом из выделенных 29 частных бассейнов за 1999–2021 гг. произошло уменьшение длины водотоков. В целом в бассейне р. Ея общая длина водотоков уменьшилась с 3221 до 2675 км или на 17,1%. Причина – распашка склонов речных долин, иногда до уреза воды, и перепланировка поверхности водосборов; следствие – повсеместное отмирание верхних участков речной и балочной сети, сокращение площади пойм, занятой влаголюбивой растительностью. Полученные результаты закладывают основу для описания механизмов водного обмена и выявления гомеостатичности речных систем, обоснованного моделирования воздействия техногенных преобразований ландшафтов и гидрографических характеристик речных геосистем на водообменные процессы и водный баланс территории Азово-Кубанской равнины.

Ключевые слова: степные реки, ландшафты, трансформация, распашка, водосбор, гидрографические характеристики, цифровая модель рельефа, ГИС, спутниковые снимки.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда в рамках проекта № 22-27-20008.

Для цитирования: Погорелов А.В., Липилин Д.А., Яроцкая Е.В. Геоинформационный анализ современных изменений гидрографических характеристик речной сети на Азово-Кубанской равнине (бассейн реки Ея). *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 161-179. DOI: 10.46698/VNC.2023.35.64.001.

GEOINFORMATICS

[DOI: 10.46698/VNC.2023.35.64.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.35.64.001)

Original paper

GIS analysis of modern changes in the hydrographic characteristics of the river network on the Azo-Kuban plain (Eya river basin)

A.V. Pogorelov ¹, D.A. Lipilin ^{1, 2}, E.V. Yarotskaya ²

¹Kuban State University, 149 Stavropolskaya Str., Krasnodar 350040, Russian Federation;

²Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 13 Kalinina Str., Krasnodar 350044, Russian Federation, e-mail: LipiLin_dmitrii@mail.ru

Received: 09.05.2023; revised: 06.06.2023; accepted: 13.06.2023

Abstract: Relevance. Agricultural land in the Krasnodar Territory accounts for 62% of the territory, most of which is located on the Azov-Kuban plain in the steppe river basins. Technogenic transformation of landscapes and river systems of the Azov-Kuban Plain occurs continuously, accompanied by changes in hydrographic characteristics and disturbances in drainage of the territory. This transformation and related water balance changes are still poorly understood. **Aim.** Quantitative assessment and analysis of ongoing transformations of the water-erosion network on the Azov-Kuban Plain in the basin of the river. Her using common hydrographic characteristics. **Methods.** In digital modeling based on the global ASTER GDEM DEM network of permanent and temporary watercourses, as well as watershed contours, the basin approach adopted in hydrology and geomodeling is implemented. Recognition of land use types (agricultural land, settlements, water bodies, swamps and forest belts) and elements of the river network in the river basin. It was performed c based on data from Landsat satellite images for the period 1999–2021. Interpretation of satellite images, modeling of the river network, mapping and analysis of spatial data were carried out in a full-featured GIS environment. Operational territorial units are 29 private river basins with area from 70 to 609 km². **Results.** The performed studies made it possible to assess the dynamics of land use types and hydrographic indicators (the length of watercourses, the density of the erosion network, the plowing and urbanization of watersheds) in the basin of the river. It covers an area of 8654 km². Transformations of the hydrographic network are manifested in the widespread reduction in the length of watercourses and a decrease in the density of the water-erosion network. In each of the allocated 29 private pools for 1999–2021. there was a decrease in the length of the streams. In general, in the river basin its total length of watercourses decreased from 3221 to 2675 km or by 17.1%. The reason is the plowing of the slopes of river valleys, sometimes up to the water's edge, and the redevelopment of the surface of the watersheds; the consequence is the widespread death of the upper sections of the river and gully network, the reduction in the area of floodplains occupied by moisture-loving vegetation. The obtained results lay the foundation for describing the mechanisms of water exchange and identifying the homeostatic nature of river systems, for sound modeling of the impact of technogenic transformations of landscapes and hydrographic characteristics of river geosystems on water exchange processes and the water balance of the Azov-Kuban Plain.

Keywords: steppe rivers, landscapes, transformation, plowing, catchment area, hydrographic characteristics, digital elevation model, GIS, satellite images.

Acknowledgments: *The study was financially supported by the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation under project No. 22-27-20008.*

For citation: Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Yarotskaya E.V. GIS analysis of modern changes in the hydrographic characteristics of the river network in the Azov-Kuban plain (Eya river basin). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 161-179. DOI: 10.46698/VNC.2023.35.64.001.

Введение

Настоящее исследование служит продолжением работ [Погорелов и др., 2021; 2022; Pogorelov et al., 2021], нацеленных на количественные оценки и причины изменения гидрографических показателей речной сети на Азово-Кубанской равнине под влиянием человеческой деятельности. Предпосылки исследования следующие. Кубань – один из лидеров в агропромышленном комплексе России, главным образом в отрасли растениеводства. В структуре земельного фонда Краснодарского края на земли сельскохозяйственного назначения в 2019 г. приходилось 4695 тыс. га или 62,2% земельных ресурсов¹ – в основном это земли в пределах Азово-Кубанской равнины и правобережья р. Кубани. Площадь посевных земель сельскохозяйственных культур в Краснодарском крае составляет 3745 тыс. га, при этом с 2014 г. площади этих земель постепенно увеличиваются. Одновременно доля продукции растениеводства в валовой сельскохозяйственной продукции в Краснодарском крае увеличилась с 62,3% в 2010 г. до 75,9% в 2021 г., что указывает на усиление растениеводческой специализации. Среди регионов Российской Федерации Краснодарский край является лидером по относительной площади ценных сельскохозяйственных угодий (53,7%). Освоение новых сельскохозяйственных земель при сложившейся структуре земельного фонда возможно лишь при перераспределении земель между категориями. В равнинной части Краснодарского края относительно нетронутыми остались только неудобья (откосы балок, заболоченные участки) общей площадью не более 1%. Отсюда понятна важность сохранения ценных свойств сельскохозяйственных земель с учетом комплекса определяющих их геоэкологических факторов, включая водно-ресурсный.

В последние годы в исследуемом регионе, расположенном в семиаридном климате степной зоны, отмечен устойчивый рост водопотребления на производственные и сельскохозяйственные нужды. В этих условиях поверхностные воды, представленные степными реками, выступают важнейшим региональным ресурсом, обеспечивающим стабильное производство продукции растениеводства [Svalova et al., 2019; Хулелидзе и др., 2016; Чотчаев и др., 2021; Сазонов и др., 2022] и, как следствие, продовольственную безопасность региона и страны. Вместе с тем, техногенное преобразование степей – глобальное явление, отмечаемое в разных странах, в частности, в [Ellis et al., 2010; Moon, 2013; Kraemer et al., 2015; Pazur et al., 2021; и др.]. На фоне трансформации степных ландшафтов деградация речных экосистем Азово-Кубанской равнины происходит непрерывно. Как было показано [Погорелов и др., 2021, 2022], речные системы (Челбас, Бейсуг, Албаши и др.) вследствие массового сооружения плотин и дамб на реках, прокладки искусственной ирригационной сети, перепланировки территории, распашки русел фактически представляют собой природно-техногенные системы с измененными

¹ Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году».

гидрографическими характеристиками и нарушенными показателями водного и минерального обмена. Наряду с повсеместным нарушением дренированности поверхности и проточности на степных реках и балках, отдельную проблему представляет собой несоблюдение водоохраных и санитарных зон вдоль водных объектов, особенно характерное для аграрных регионов нашей страны [Скрипчинский и др., 2022].

Техногенному изменению гидрографических характеристик степных рек уделяется мало внимания, несмотря на значимость вопросов изменения естественной дренированности территории Азово-Кубанской равнины и последствий потери гомеостатичности речных систем в результате перестройки водообменных процессов. Отдельные публикации [Гайдай, 2006; Белюченко, 2010, 2017; Суслов, 2015; Экология речных..., 2017], как правило, сосредоточены на биологических, химических, биоэкологических проблемах степных рек и не оценивают балансовые и режимные изменения водообмена в речных бассейнах. Исследования водно-балансовых свойств степных агроландшафтов [Барабанов, Панов, 2021] свидетельствуют об ухудшении их водного режима при земледелии, в частности, в результате снижения инфильтрационной способности почвы и роста поверхностного стока. Не удивительно, что в степных регионах России, включая Краснодарский край, за последние десятилетия ухудшилось мелиоративное состояние орошаемых земель [Демин, 2021]. При постановке задач мы опирались на бассейновый подход [Корытный, 2001], позволяющий обосновать ландшафтно-гидрологическую организацию территории, поскольку речному бассейну на любом иерархическом уровне присущи механизмы (само) регулирования геоморфологических и гидрологических процессов, почвообразования, элементов биоты и других взаимосвязанных процессов.

К наиболее показательным гидрографическим характеристикам¹ в контексте преобразований водного баланса территории Азово-Кубанской низменности и последующих геоэкологических эффектов отнесём длину водотоков, густоту эрозивной сети, распаханность и урбанизированность территории речных бассейнов.

Объект и методы исследования

Объект исследования. Бассейн реки Ея занимает северную часть Азово-Кубанской низменности (рис. 1). Поверхность низменности, имеющей преимущественно аккумулятивное и денудационно-аккумулятивное происхождение, слабо расчленена, речные долины, как правило, неглубокие, водоразделы плохо выражены; встречаются западины. Низменность сложена в основном легко поддающимися эрозии лессовидными суглинками, песчано-глинистыми отложениями.

Согласно принятому гидрологическому районированию [Ресурсы..., 1973] бассейн р. Ея входит в Восточный Приазовский гидрографический район, включающий 605 маловодных степных рек, из которых река Ея – самая крупная по площади водосбора (8654 км²) и длине (311 км). Исток Еи расположен в 6 км южнее станицы Новопокровской в месте слияния рек Упорной и Корсун на высоте около 80 м [Лурье, Панов, 2021]; впадает река в Ейский лиман. Бассейн имеет асимметричную форму с заметно расширенной верхней частью, имеющей развитую сеть притоков (рис. 1). Наиболее крупные притоки – Сосыка (левобережье) и Куго-Ея (правобере-

¹ Р 52.08.874-2018. Рекомендации. Определение гидрографических характеристик картографическим способом. Росгидромет. СПб. 2018. 172 с.

жье).



Рис. 1. Бассейны р. Ея на территории Краснодарского края и Ростовской области /
Fig. 1. Basin of the Eya river in the Krasnodar and Rostov territory

Границы бассейна повсеместно представлены слабовсхолмленными плоскими водоразделами. В верховьях элементы долины реки морфологически плохо выражены. Склоны речной долины практически на всем протяжении слабо расчлененные, пологие (рис. 2); русло умеренно- или слабоизвилистое. Пойма появляется ниже впадения р. Терновка, достигая ширины 0,2-0,3 км, и увеличивается вблизи устья до 6-7 км. Ниже впадения р. Сосыка пойма сильно заболочена, изрезана протоками и мелкими озерами. Ширина русла изменяется от 5–30 м в верховьях до 150–200 м в нижнем течении.

Основной источник питания – атмосферные осадки, грунтовое питание незначительное. В летнее время, когда потребность в водоснабжении наибольшая, участие атмосферных осадков в формировании стока из-за высоких потерь на испарение резко снижается. Средний годовой сток Еи составляет 109,5 млн м³, средний годовой расход воды равен 4,32 м³/с, слой стока – 40 мм. При этом 85% стока проходит в течение февраля – мая. Скорость течения в период весеннего по-

ловодья, как правило, не превышает 0,6-0,7 м/с, в другое время наблюдается лишь непосредственно ниже плотин. В летне-осеннюю межень из-за незначительного стока и обилия плотин многие малые реки и ручьи в составе гидрографической сети бассейна р. Ея пересыхают. Действующую площадь бассейна, т.е. площадь, на которой происходит формирование поверхностного и грунтового стока, в бассейне р. Ея определяют в 870 км² [Суслов, 2015], что в 10 раз меньше всей площади бассейна.



Рис. 2. Река Ея в среднем течении (фото Липилин Д.А., 2018 г.) /

Fig. 2. River Eya in the middle course (photo by Lipilin D.A., 2018)

Русло реки Ея в настоящее время представлено цепочкой многочисленных прудов, число которых оценивается от 733 [Лурье, Панов, 2021] до 749 [Суслов, 2015], использующихся для орошения, рекреации, рыбозаведения. Многочисленные гидротехнические перегораживающие сооружения в виде русловых плотин – земляных насыпей и мостовых переходов (рис. 3) – относятся к категории активных с позиции воздействия на русловые процессы. Пруды с суммарной площадью зеркала более 110 км² практически полностью перехватывают речной сток в межень. Подобная зарегулированность речного стока способствует заилению русел, увеличению безвозвратных потерь стока, а в целом приводит к радикальной перестройке вещественно-обменных процессов в степных реках. Большая часть перегораживающих сооружений построена без проектной документации. Значительная часть плотин и нерегулируемых водосбросных сооружений требует ремонтных работ.

Зарегулированность речного стока перегораживающими сооружениями оценивалась по материалам их инвентаризации ОАО ПИИ «Кубаньводпроект» (2000 г.) и

результатам наших наземных обследований.



Рис. 3. Типичные русловые плотины на р. Ея – в виде земляной насыпи выше ст. Калниболотской (вверху), с автодорожным мостом в пос. Советский (внизу) /

Fig. 3. Typical dams on the Eya River – in the form of an earth embankment above Kalnibolotskaya village (above) and with a road bridge in the Sovetsky village (below)

Дополнительно распознавание водохозяйственных сооружений выполнялось с использованием спутниковых снимков Landsat 8. Дешифровочными признаками выступали специфическое пространственное положение плотин поперёк речного русла и наличие подъездных путей [Погорелов и др., 2021]. Всего в 2023 г. в бассейне р. Ея выявлено 1160 перегораживающих сооружений (рис. 4). Отметим, что для оценки их влияния на условия дренированности и водный баланс территории необходимы специальные исследования.



Рис. 4. Распределение перегораживающих сооружений на реке Ея /

Fig. 4. Distribution of dams on the river of the Eya

Значимым фактором техногенного воздействия на речную сеть выступает застройка территории: в 2023 г. в исследуемом бассейне насчитывалось 142 населённых пункта общей площадью 540,3 км².¹

Методы исследования

Цифровое моделирование сети тальвегов (постоянных и временных водотоков) и границ бассейнов выполнено по предварительно откорректированной глобальной ЦМР ASTER GDEM2 [ASTER..., 2009; Atroshchenko et al., 2022]. При делении поверхности на частные бассейны, имея в виду фрактальный характер речной сети, мы исходили из относительной гомогенности развития гидрографической сети в границах выделяемых бассейнов. Распознавание типов землепользования с учетом заданного периода (1999–2021 гг.) выполнено по спутниковым снимкам Landsat (табл. 1), пространственное разрешение которых сопоставимо с разрешением ЦМР ASTER GDEM2.

Таблица 1 / Table 1

**Сведения об использованных космических снимках /
Information about the used satellite images**

Космический аппарат / Satellite	Дата снимка / Date	ID снимка / ID of satellite images	Пространственное разрешение, м / Spatial resolution, m
Landsat 7	01.10.1999	LE71750281999274NSG01	30
Landsat 7	03.10.1999	LE71730281999276SGS00	30
Landsat 7	11.11.1999	LE71740281999315SGS00	30
Landsat 8	10.07.2021	LC81740282021191LGN00	30
Landsat 8	17.07.2021	LC81750282021198LGN00	30
Landsat 8	19.07.2021	LC81730282021200LGN00	30

Поверхности исследуемого бассейна свойственно ограниченное количество типов землепользования. За основу типизации принята универсальная номенклатура базы данных покрытия/землепользования, разработанная для европейской программы CORINE Land Cover (CLC)². Имеющийся опыт использования этой номенклатуры базы данных свидетельствует о возможности ее применения для анализа техногенных преобразований речной сети. Выделено четыре типа характерных поверхностей/землепользования: 1) сельскохозяйственные угодья (Agricultural areas), 2) населенные пункты и объекты инфраструктуры (Artificial surfaces), 3) плавни (болота) и лесополосы (Wetland, Forests and semi-natural areas), 4) водные объекты. Объединение плавней и лесополос в единый тип вызвано объективной сложностью распознавания на спутниковых изображениях болотной и древесной растительности. Методика дешифрирования спутниковых снимков в программе ENVI описана

¹ Указанная площадь отличается от площади населенных пунктов (застройки), полученной при дешифрировании спутниковых снимков, поскольку административные границы включают поверхности с разными типами землепользования.

² <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>

[Погорелов и др., 2021]. Уточнение положения сети постоянных и временных водотоков, а также результатов дешифрирования типов землепользования осуществлялось с помощью геосервиса Google Earth Pro. Процедуру распознавания элементов водно-эрозионной сети на спутниковых снимках, а также оценку ее изменений иллюстрирует рисунок 5.

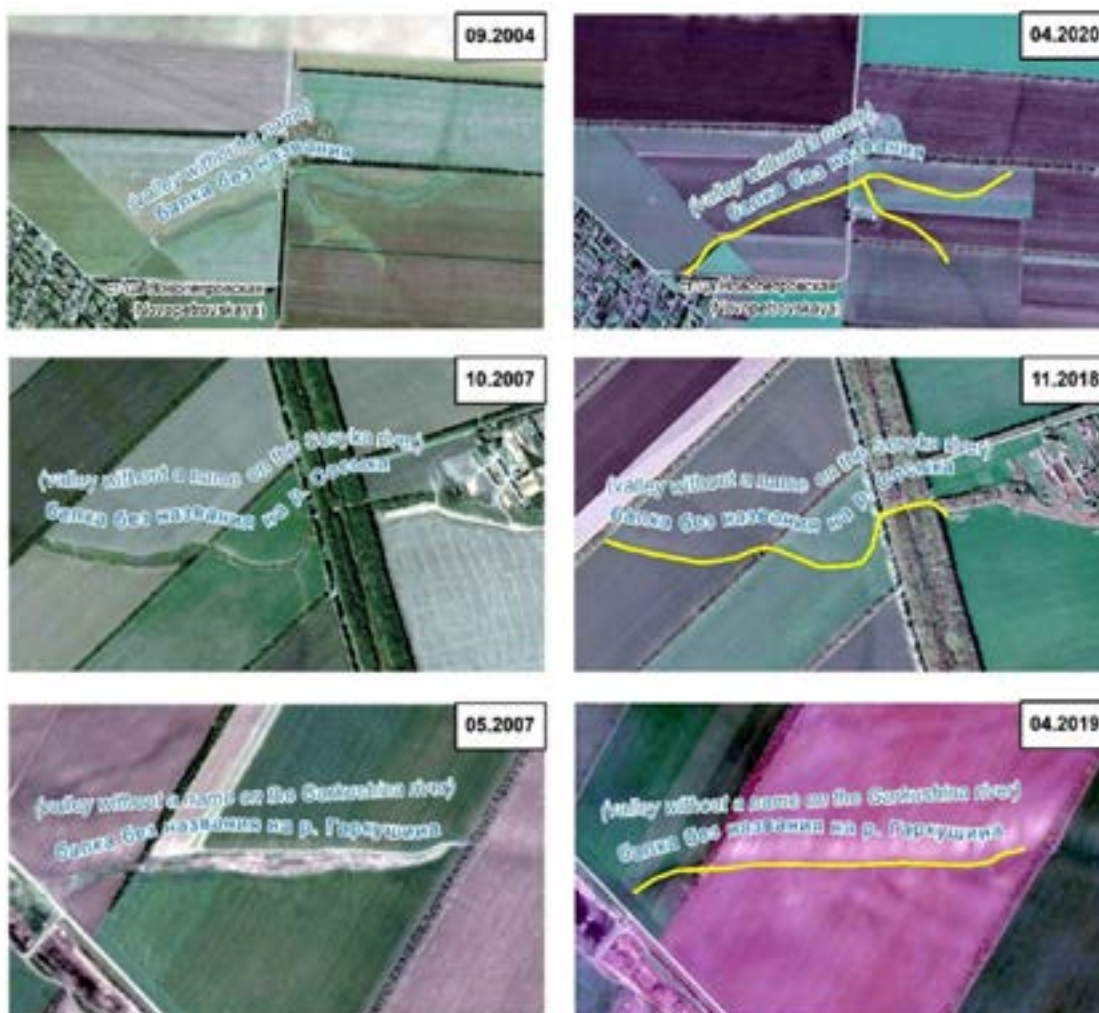


Рис. 5. Уменьшение длины водно-эрозионной сети в результате распашки и вертикальной планировки поверхности в бассейне р. Ея. Уничтоженные водотоки выделены желтым цветом/
 Fig. 5. Decreases in the length of the erosion network as a result of plowing and vertical leveling of the surface in the Eya river basin. Eliminated streams are highlighted in yellow

Результаты работы и их обсуждения

В результате векторизации границ водосборов в исследуемом бассейне выделено 29 частных бассейнов, площадь которых варьирует от 70 (балка Попова) до 609,5 км² (Корсун) (рис. 6, табл. 2). Азово-Кубанская равнина на большей своей части представлена плоским или слабовсхолмленным рельефом, поэтому автоматизированное выделение водоразделов на некоторых участках приводило к артефактам, что потребовало ручной корректировки границ частных бассейнов. Обобщенные результаты дешифрирования типов поверхности/землепользования в границах

частных бассейнов представлены в таблице 2.

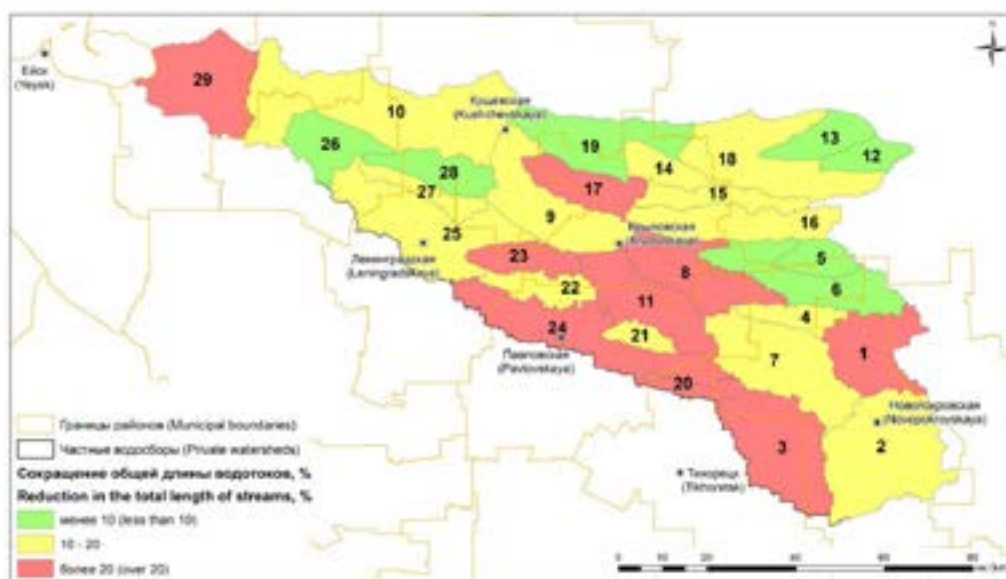


Рис. 6. Выделенные частные бассейны в бассейне р. Ея. Изменение длины водотоков за период 1999–2021 гг. в частных бассейнах /

Fig. 6. Changes in the length of watercourses for the period 1999-2021 in the studied basins

Таблица 2 / Table 2

Распределение типов поверхностей в частных бассейнах в бассейне р. Ея /
Distribution of surface types in basins in the Eya river basin

№	Частный бассейн / Private basin	Площадь, км ² / Area, km ²	1999 г. / 1999 year				2021 г. / 2021 year			
			Населенные пункты и объекты инфраструктуры, % / Settlements and infrastructure facilities, %	Плавни и лесополосы, % / Swamps and forest belts, %	Водные объекты, % / Water objects, %	Сельскохозяйственные поля, % / Agricultural fields, %	Населенные пункты и объекты инфраструктуры, % / Settlements and infrastructure facilities, %	Плавни и лесополосы, % / Swamps and forest belts, %	Водные объекты, % / Water objects, %	Сельскохозяйственные поля, % / Agricultural fields, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Горькая / Gorkaya	311,80	1,69	2,55	0,81	94,94	2,57	6,52	0,73	90,18
2	Корсун / Korsun	609,49	3,59	2,53	0,68	93,20	6,15	6,84	0,84	86,17
3	Терновка / Ternovka	466,37	3,30	3,56	0,96	92,18	7,54	10,97	1,22	80,27
4	балка Водяная / Vodyanaya valley	108,64	2,51	1,35	1,31	94,83	6,00	5,26	1,25	87,50
5	Терноватая / Терноватая	114,35	0,89	1,39	0,38	97,34	2,89	9,68	0,54	86,89
6	Плоская / Ploskaya	346,37	1,61	1,22	0,67	96,49	4,17	6,38	0,97	88,48
7	Ея (верхнее течение) / Eya (upperflow)	480,68	3,09	2,12	1,91	92,88	5,96	8,57	1,90	83,56

8	Ея (среднее течение 2) / Eya (middleflow 2)	339,73	3,50	3,29	1,61	91,60	9,45	7,62	1,45	81,48
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
9	Ея (среднее течение 1) / Eya (middleflow 1)	406,17	8,27	4,91	1,37	85,46	5,37	6,88	0,90	86,85
10	Ея (нижнее течение) / Eya (downflow)	850,70	8,15	6,79	2,81	82,25	3,47	10,53	1,03	84,97
11	Весёлая / Vesolaya	342,47	5,46	2,41	0,67	91,46	5,10	10,34	0,65	83,91
12	Мокрая Грязнуха / Mokraя Gryaznukha	108,15	1,61	1,21	0,89	96,28	3,74	2,19	0,88	93,19
13	Егорлычек / Yegorlychek	156,15	6,43	1,86	0,90	90,81	9,38	3,13	0,97	86,52
14	Гезова / Gezova	120,12	3,27	1,77	0,60	94,37	3,32	8,68	0,41	87,59
15	Грузская / Gruzskaya	160,82	5,47	2,35	1,18	91,00	6,54	15,28	1,02	77,16
16	Кавалерка (верхнее течение) / Kavalerka (upperflow)	313,86	2,72	1,37	0,70	95,21	4,42	9,68	0,81	85,08
17	Кавалерка (нижнее течение) / Kavalerka (downflow)	205,15	3,72	3,28	0,94	92,05	3,25	4,60	0,85	91,30
18	Куго-Ея (верхнее течение) / Kugo-Eya (upperflow)	495,17	2,58	1,86	1,00	94,56	6,35	6,20	0,68	86,77
19	Куго-Ея (нижнее течение) / Kugo-Eya (downflow)	355,51	5,82	3,21	1,21	89,76	4,97	8,11	0,54	86,37
20	балка Смертина / Smertina valley	74,00	4,02	2,13	0,68	93,17	3,52	16,09	0,51	79,88
21	балка Попова / Popova valley	69,98	6,94	2,64	1,16	89,26	11,92	11,50	1,15	75,42
22	Бичевая / Bichevaya	140,60	6,48	2,71	0,69	90,12	5,12	11,42	0,79	82,67
23	балка Максимова / Maksimova valley	150,79	11,05	2,81	0,77	85,36	6,04	7,10	0,84	86,02
24	Соська (верхнее течение) / Sosyka (upperflow)	490,68	8,46	2,78	1,07	87,70	8,43	11,79	1,15	78,63
25	Соська (среднее течение) / Sosyka(middleflow)	513,08	10,52	4,23	2,03	83,22	5,59	6,69	1,82	85,90
26	Соська (нижнее течение) / Sosyka(downflow)	208,26	15,67	6,18	4,17	73,98	10,33	11,00	2,94	75,74
27	балка Широкая / Shirokaya valley	110,19	4,02	3,90	0,14	91,94	1,92	6,12	0,01	91,94
28	балка Добренькая / Dobrenkayavalley	181,10	6,29	3,76	1,22	88,74	2,57	5,28	1,15	91,01
29	Устьевая часть реки Ея / Estuary of the Eyariver	423,80	12,57	23,09	1,91	62,43	4,54	24,04	2,95	68,47

Территория в целом / Territory as a whole	8654,18	5,84	4,22	1,37	88,58	5,57	9,17	1,16	84,10
--	---------	------	------	------	-------	------	------	------	-------

Рисунок 7 иллюстрирует некоторые результаты распознавания на спутниковых снимках типов землепользования и их динамику в бассейне р. Ея за период 1999–2021 гг. Обратимся к структуре землепользования. В 2021 г. в бассейне р. Ея сельскохозяйственные поля занимали 84,1% общей площади, плавни и лесополосы – 9,17%, населенные пункты – 5,57%, водные объекты – 1,16% (табл. 2). В каждом из 29 выделенных бассейнов низшего порядка сельскохозяйственные поля доминируют с долей земель от 68,5 до 91,9%, демонстрируя наименьшую изменчивость в структуре землепользования. Лишь в одном бассейне (устьевая часть реки Ея) с площадью плавней 24% доля сельскохозяйственных полей оказалась менее 70%, что свидетельствует о существенном участии агроценозов в ландшафтообразовании. Относительная изменчивость других типов землепользования на порядок выше и имеет сопоставимые показатели, отражая сложившуюся в настоящее время структуру землепользования на данной территории Азово-Кубанской равнины

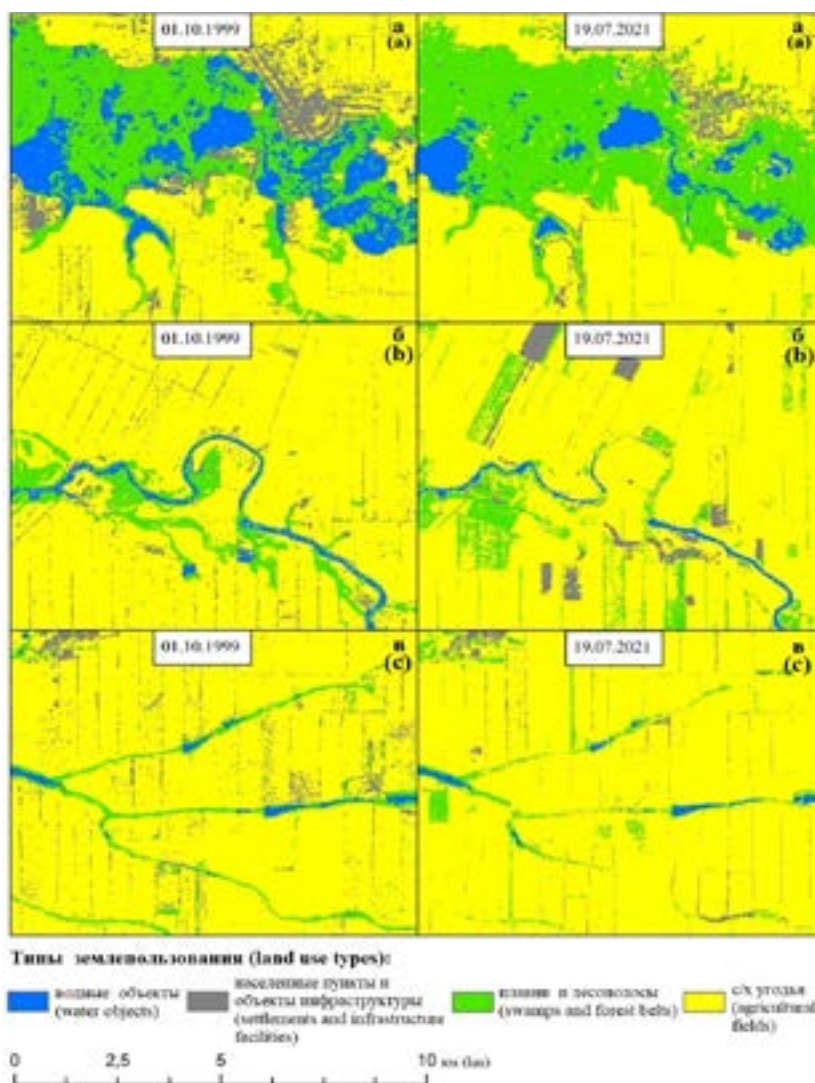


Рис. 7. Дешифрирование типов землепользования по данным спутников Landsat и примеры изменений землепользования в 1999–2021 гг. в бассейне р. Ея в районе населенных пунктов с. Елизаветовка (а), ст. Крыловская (б), пос. Комсомольский и пос. Заветы Ильича (в) /

Fig. 7. Recognition of land use types from Landsat satellites and examples of land use changes in 1999–2021 in the Eya river basin in the area of settlements Elizavetovka (a), Krylovskaya (b), Komsomolsky and Zavety Ilich (c)

Вместе с тем, за 1999–2021 гг. структура землепользования в бассейне р. Ея (табл. 2) претерпела характерные изменения, выразившиеся, прежде всего, в сокращении площади сельскохозяйственных полей с 88,6 до 84,1%. Такое сокращение сопровождалось увеличением площади населенных пунктов (урбанизация) (рис. 7) и заболоченных территорий. Ранее подобная временная динамика в структуре землепользования отмечена нами в бассейнах р. Бейсуг и р. Челбас [Погорелов и др., 2021, 2022]. Выявленные преобразования в бассейне р. Ея и в частных бассейнах следует рассматривать с позиции динамики гидрографических характеристик, к которым относятся урбанизированность и распаханность территории.

Среди гидрографических характеристик наиболее показательной в аспекте изменения речной сети является длина водотоков (табл. 3). В целом в бассейне р. Ея за 1999–2021 гг. произошло весьма существенное сокращение общей длины водотоков – с 3221,5 до 2674,6 км, то есть на 17,1%, за счет преобразований водно-эрозионной сети в частных бассейнах. За 22 года отмечено уменьшение относительной суммарной длины водотоков в каждом их частных бассейнов – от 2,6% (р. Егорлычек) до 27,8% (р. Терновка). Сопоставимое сокращение относительной длины водотоков отмечено в крупных речных бассейнах Азово-Кубанской равнины – бассейнах р. Бейсуг (на 17,2%) [Погорелов и др., 2021] и р. Челбас (на 16,5%) [Погорелов и др., 2022]. Это свидетельствует о деградации речной сети как общем явлении на Азово-Кубанской равнине. Наряду с повсеместным сокращением длины водотоков наблюдается и пропорциональное уменьшение густоты эрозионной сети, которая определяет активность флювиальных процессов и дренированность исследуемой территории.

Таблица 3 / Table 3

Изменения за 1999–2021 гг. длины водотоков и площади поймы / Changes for 1999–2021 in the length of watercourses and the density of the erosion network

№	Частные бассейны / Private basin	Площадь бассейна, км ² / Area of basin, km ²	Длина водотоков, км / Length of water object, km			Площадь поймы, км ² / Floodplain area, km ²		
			1999 г. / 1999 year	2021 г. / 2021 year	Изменение за 1999–2020 гг., % / Change for 1999–2020 year, %	1999 г. / 1999 year	2021 г. / 2021 year	Изменение за 1999–2021 гг., % / Change for 1999–2020 year, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Горькая / Gorkaya	311,80	109,05	80,61	-26,09	10,14	7,82	-22,91
2	Корсун / Korsun	609,49	156,04	135,66	-13,06	16,36	14,67	-10,31
3	Терновка / Ternovka	466,37	221,28	159,77	-27,80	23,71	17,01	-28,26
4	балка Водяная / Vodyanaya valley	108,64	29,15	24,68	-15,32	3,96	3,32	-16,07
5	Терноватая / Терноватая	114,35	32,87	30,69	-6,61	3,24	2,89	-10,59
6	Плоская / Ploskaya	346,37	91,62	83,72	-8,62	10,37	9,38	-9,55

7	Ея (верхнее течение) / Eya (upperflow)	480,68	204,79	165,83	-19,02	25,49	21,84	-14,32
1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	Ея (среднее течение 2) / Eya (middleflow 2)	339,73	149,69	114,74	-23,35	23,19	19,36	-16,51
9	Ея (среднее течение 1) / Eya (middleflow 1)	406,17	216,88	175,12	-19,26	33,12	21,94	-33,76
10	Ея (нижнее течение) / Eya (downflow)	850,70	476,97	404,59	-15,18	119,50	87,39	-26,87
11	Весёлая / Vesolaya	342,47	123,17	93,48	-24,10	13,71	9,59	-30,03
12	Мокрая Грязнуха / Mokraя Gryaznukha	108,15	34,31	33,13	-3,42	4,11	3,84	-6,65
13	Егорлычек / Yegorlychek	156,15	48,33	47,10	-2,55	4,99	4,85	-2,87
14	Гезова / Gezova	120,12	0,40	0,34	-16,05	3,06	2,64	-13,86
15	Грузская / Gruzskaya	160,82	49,67	43,92	-11,58	5,86	5,19	-11,47
16	Кавалерка (верхнее течение) / Kavalerka (upperflow)	313,86	84,10	73,93	-12,09	9,98	8,39	-15,91
17	Кавалерка (нижнее течение) / Kavalerka (downflow)	205,15	89,76	68,44	-23,75	11,06	9,19	-16,92
18	Куго-Ея (верхнее течение) / Kugo-Eya (upperflow)	495,17	168,30	142,19	-15,52	19,40	16,66	-14,09
19	Куго-Ея (нижнее течение) / Kugo-Eya (downflow)	355,51	151,88	136,75	-9,96	17,35	16,21	-6,59
20	балка Смертина / Smertina valley	74,00	26,14	20,36	-22,11	3,19	2,08	-34,75
21	балка Попова / Popova valley	69,98	19,81	16,90	-14,70	3,02	2,51	-16,87
22	Бичевая / Bichevaya	140,60	42,29	36,58	-13,50	5,32	4,58	-13,87
23	балка Максимова / Maksimovavalley	150,79	46,09	34,51	-25,13	5,82	4,67	-19,81
24	Сосыка (верхнее течение) / Sosyka (upperflow)	490,68	172,08	133,81	-22,24	20,69	16,55	-19,98
25	Сосыка (среднее течение) / Sosyka(middleflow)	513,08	238,71	208,54	-12,64	35,18	31,04	-11,77
26	Сосыка (нижнее течение) / Sosyka(downflow)	208,26	73,57	67,52	-8,22	23,32	18,24	-21,76
27	балка Широкая / Shirokaya valley	110,19	38,61	34,50	-10,66	4,50	3,68	-18,26
28	балка Добренькая / Dobrenkaya valley	181,10	65,73	59,38	-9,66	9,62	8,56	-11,03

29	Устьевая часть реки Ея / Estuary of the Eya river	423,80	65,23	47,87	-26,62	117,28	115,39	-1,61
	Весь бассейн / Whole basin	8654,18	3226,52	2674,65	-17,10	586,53	489,48	-16,55

Пространственная дифференция преобразований речной сети представлена на картах (рис. 6 и 8). В исследуемом бассейне сокращению длины водотоков в наибольшей мере подвержены водосборы в верхней и средней части бассейна (Горькая, Терновка, Весёлая, балка Смертина, Сосыка в верхнем течении и др.) (рис. 6), где распашка русел и «вертикальная» перепланировка территории наиболее выражены. Установлено, что в результате ползучей экспансии пашни наблюдается повсеместное «отмирание» верхних звеньев водно-эрозионной сети, а в ряде случаев и участков поймы (табл. 3, рис. 8). Распашка склонов речных долин и балок до уреза воды приводит к замене специфической пойменной растительности сельскохозяйственными культурами. В некоторых случаях в течение 10–15 лет после перепланировки и распашки на поверхности водосборов практически исчезают какие-либо признаки дренажной сети и почвенно-растительного покрова пойм (рис. 5). В совокупности это приводит к перестройке водообменных процессов территории, чему способствует заиление русел, зарегулированность стока, антропогенная трансформация растительности в агроценозах.

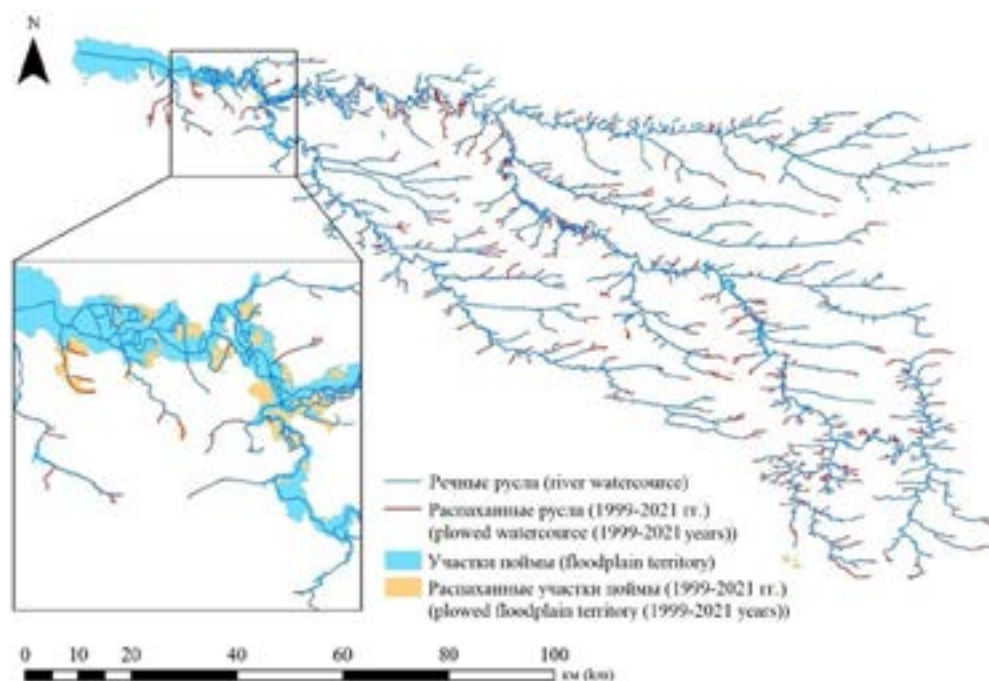


Рис. 8. Изменения водно-эрозионной сети в бассейне р. Ея за 1999–2021 гг. вследствие распашки /

Fig. 8. Changes in the system of river channels in the Eya river basin for 1999–2021 due to plowing

Реки Азово-Кубанской равнины имеют естественные низкие значения коэффициента стока. По данным [Суслов, 2015] у р. Ея с действующей площади водосбора, т.е. с которой происходит формирование поверхностного и грунтового стока, он равен 0,4. Поверхностное и грунтовое питание степных рек сосредоточено на ограниченной поверхности водосбора. В бассейне р. Ея фактически реч-

ной сток формируется примерно на 10% площади бассейна. Один из механизмов нарушения водообменных процессов проявляется через уменьшение коэффициента стока за счет наблюдаемого уменьшения длины и густоты речной и балочной сети.

Выводы

1. Влияние техногенных преобразований ландшафтов и гидрографических характеристик речных геосистем (длина водотоков, густота эрозионной сети, распаханность и урбанизированность водосборов) на водообменные процессы и водный баланс территории Азово-Кубанской равнины остается плохо изученным. В условиях семиаридного климата равнинной части Краснодарского края нарушение дренирующей способности территории увеличивает затраты на сохранение ценных свойств сельскохозяйственных земель.

2. В бассейне р. Ея на площади 8654 км² по состоянию на 2021 г. по данным спутниковых снимков и полевых исследований в речных руслах насчитывается 1160 перегораживающих сооружений. Строительство плотин и прудов в бассейне р. Ея (более 700) вызывает «стихийное» регулирование стока и радикальную перестройку вещественно-обменных процессов в реках.

3. По данным дешифрирования спутниковых снимков в бассейне р. Ея в 2021 г. на сельскохозяйственные угодья приходилось 84,1% площади, на населенные пункты и объекты инфраструктуры – 5,57%, на болота и лесополосы – 9,17%, на водные объекты – 5,57%. В течение 1999–2021 гг. произошло небольшое (на 4,5%) сокращение площади сельскохозяйственных земель при росте площади населенных пунктов и заболоченных территорий.

4. Преобразования гидрографической сети наиболее выражены в повсеместном сокращении длины водотоков и уменьшении плотности водно-эрозионной сети. Причина – распашка склонов речных долин и перепланировка поверхности водосборов. В каждом из выделенных 29 частных бассейнов за 22 года произошло уменьшение длины водотоков. В целом в бассейне р. Ея общая длина водотоков уменьшилась с 3221 до 2675 км или на 17,1%. Следствие – повсеместное отмирание верхних участков речной и балочной сети, сокращение площади пойм, занятой влаголюбивой растительностью.

5. Выполненный анализ расширяет представления о происходящих в последние десятилетия изменениях гидрографических характеристик рек в степной зоне Краснодарского края и отчасти Ростовской области. Полученные результаты закладывают основу для описания механизмов вещественного обмена и выявления гомеостатичности речных систем, обоснования направленности и темпов их преобразований, а в перспективе – оценки влияния этих механизмов на геохимические эффекты перестройки степных ландшафтов.

Литература

1. Скрипчинский А.В., Бадов А.Д., Бадов О.А., Борисов Д.Д. Анализ состояния водозащитной зоны городского округа Дербент на основе ГИС-технологий. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. №4. – С. 180–192. – DOI 10.46698/VNC.2022.39.75.014. – EDNYXVSZQ.

2. Барабанов А.Т., Панов В.И. Преобразование гидрологического режима степных агроландшафтов. // *Степи Северной Евразии*. – 2021. – Т. 9. – С. 105–110.

3. Белюченко И.С. Функционирование степных рек Краснодарского края и перспективы их развития. // Экология речных ландшафтов: сб. статей по материалам I Межд. экол. конф. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – С. 28–43.
4. Белюченко И.С. Экологическое состояние бассейнов степных рек Кубани и перспективы их развития. // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2010. – Т. 6. №2. – С. 5–12.
5. Демин А.П. Трансформация состояния орошаемых земель в степных регионах России. // Степи Северной Евразии. – 2021. – Т. 9. – С. 260–266.
6. Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании: монография. – Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2001. – 63 с.
7. Лурье П.М., Панов В.Д. Реки бассейна Азовского моря: Гидрография и режим стока. – Ростов-на-Д: Донской издательский дом, 2021. – 672 с.
8. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Дудкина А.А., Копанева О. В. О техногенных преобразованиях речной сети на Азово-Кубанской равнине (реки Челбас, Албаши). // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». – 2022. – Т. 28(2). – С 567–582. – DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-567-582
9. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Киселев Е.Н. Об изменении гидрографических характеристик рек в степных агроландшафтах за последние десятилетия (на примере бассейна р. Бейсуг, Краснодарский край). // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». – 2021. – Т. 27(4). – С. 19–32. – DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-19-32
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 8. Северный Кавказ. / Под ред. В.В. Куприянова. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 447 с.
11. Сазонов А.Д., Закруткин В.Е, Решетняк О.С. Временная изменчивость поверхностного гидрохимического стока в бассейне реки Большой Егорлык в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №2. – С. 117–130. – DOI 10.46698/VNC.2022.37.47.009. – EDNRKRHGF.
12. Суслов О.Н. Степные реки Краснодарского края. – Краснодар: Куб ГАУ, 2015. – 256 с.
13. Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Заалишвили В.Б., Бетрозов З.С. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8. №1. – С. 46–51. – DOI 10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51
14. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007
15. Экология речных ландшафтов. // В сб. статей по материалам I Межд. экол. конф. / Отв. за вып. Н.Н. Мамась. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – 267 с.
16. ASTER Global DEM Validation. Summary Report. ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS. – 2009. – 28 p.
17. Atroshchenko V., Dyachenko R., Gura D., Vidovskiy L., Dovgal V., Doumit J. Analysis of Methods for Classifying and Segmenting 3D Images. // Communications in Computer and Information Science. – 2022. – 1703 CCIS. – pp. 104–116. – DOI: 10.1007/978-3-031-21340-3_10.
18. Pogorelov A.V., Laguta A.A., Kiselev E.N., Lipilin D.A. Features of the long-term transformation of the Krasnodar reservoir, near the mouth of the Kuban river, Russia. // Journal of Geographical Sciences. – 2021. – Vol. 31. – pp. 1895–1904. DOI: 10.1007/s11442-021-1928-7.
19. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., et al. Complex Environmental Monitoring in Russia and India. // Geology and Geophysics of the South of Russia. – 2019. – Vol. 9. No.4. – pp. 87-101. DOI 10.23671/VNC.2019.4.44491. EDN TEBPHV.
20. Pazur R., Prishchepov A.V., Myachina K., Verburg P.H., Levykin S., Ponkina E.V., Kazhakov G., Yakovlev I., Akhmetov R., Rogova N., Bürgi M. Restoring steppe landscapes: pat-

terns, drivers and implications in Russia's steppes. // *Landscape Ecology*. – 2021. – Vol. 36. – pp. 407–425. DOI: 10.1007/s10980-020-01174-7

21. Kraemer R., Prishchepov A.V., Muller D., Kuemmerle T., Radeloff V.C., Dara A., Terekhov A., Fruhauf M. Long-term agricultural land-cover change and potential for cropland expansion in the former Virgin Lands area of Kazakhstan. // *Environmental Research Letters*. – 2015. – Vol. 10(5). 054012. DOI: 10.1088/1748-9326/10/5/054012

22. Moon D. *The Plough that Broke the Steppes*. Oxford University Press, Oxford. – 2013. – 319 p.

23. Ellis E.C., Klein Goldewijk K., Siebert S., Lightman D., Raman-kutty N. Anthropogenic transformation biomes, 1700 to 2000. // *Global Ecology and Biogeography*, (Global Ecol. Biogeogr.). – 2010. – No.19. – pp. 589–606. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x

References

1. Skripchinsky A.V., Badov A.D., Badov O.A., Borisov D.D. Analysis of the state of the water protection zone of the urban district of Derbent based on GIS technologies. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2022. Vol. 12. No.4. pp. 180-192. DOI: 10.46698/VNC.2022.39.75.014. EDN YXVSZQ.

2. Barabanov A.T., Panov V.I. Transformation of the hydrological regime of steppe agricultural landscapes. *Steppes of Northern Eurasia*. 2021. Vol. 9. pp. 105-110.

3. Belyuchenko I.S. Functioning of the steppe rivers of the Krasnodar territory and prospects for their development. *Ecology of river landscapes: coll. articles on materials I Int. ecol. conf. Rep. for issue N. N. Mamas*. Krasnodar. KubGAU, 2017. pp. 28-43.

4. Belyuchenko I.S. Ecological state of the basins of the steppe rivers of the Kuban and prospects for their development. *Ecological Bulletin of the North Caucasus*. 2010. Vol. 6. No.2. pp. 5-12.

5. Demin A.P. Transformation of the state of irrigated lands in the steppe regions of Russia. *Steppes of Northern Eurasia*. 2021. Vol. 9. pp. 260-266.

6. Korytny L.M. Basin concept in nature management: monograph. Irkutsk. Publishing House of the Institute of Geography SB RAS, 2001. 63 p.

7. Lurie P.M., Panov V.D. Rivers of the Azov Sea basin: Hydrography and runoff regime. Rostov-on-Don. Donskoy publishing house, 2021. 672 p.

8. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Dudkina A.A., Kopaneva O.V. On technogenic transformations of the river network in the Azov-Kuban Plain (Chelbas, Albashi rivers). *Proceedings of the International Conference «InterCarto. InterGIS»*. 2022. Vol. 28(2). pp. 567-582. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-567-582

9. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kiselev E.N. On the change in the hydrographic characteristics of rivers in the steppe agrolandscapes over the past decades (on the example of the Beisug river basin, Krasnodar Territory). *Proceedings of the International Conference «InterCarto. InterGIS»*. 2021. Vol. 27(4). pp. 19–32. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-19-32.

10. Surface water resources of the USSR. T. 8. North Caucasus. Ed. V.V. Kupriyanov. Leningrad. Gidrometeoizdat, 1973. 447 p.

11. Sazonov A.D., Zakrutkin V.E., Reshetnyak O.S. Temporal variability of surface hydrochemical runoff in the Bolshoi Egorlyk River basin under anthropogenic impact and climate change. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2022. Vol. 12. No.2. pp. 117-130. DOI 10.46698/VNC.2022.37.47.009. EDN RKRHGF.

12. Suslov O.N. *Steppe rivers of the Krasnodar Territory*. Krasnodar. KubSAU, 2015. 256 p.

13. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betzov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016. Vol. 8(1). pp. 46–51. (In Russ.)

14. Chotchaev Kh.O., Burdzieva, O.G., Zaalishvili, V.B. Zoning of high mountainous areas

by geocological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.1. pp. 81–94. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007

15. Ecology of river landscapes: Sat. articles on materials I Int. ecol. conf. Rep. for issue N.N. Mom. Krasnodar. KubGAU, 2017. 267 p.

16. ASTER Global DEM Validation. Summary Report. ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS. 2009. 28 p.

17. Atroshchenko V., Dyachenko R., Gura D., Vidovskiy L., Dovgal V., Doumit J. Analysis of Methods for Classifying and Segmenting 3D Images. *Communications in Computer and Information Science*. 2022. 1703 CCIS. pp. 104–116. DOI: 10.1007/978-3-031-21340-3_10

18. Pogorelov A.V., Laguta A.A., Kiselev E.N., Lipilin D.A. Features of the long-term transformation of the Krasnodar reservoir, near the mouth of the Kuban river, Russia. *Journal of Geographical Sciences*. 2021. Vol. 31. pp. 1895–1904. DOI: 10.1007/s11442-021-1928-7.

19. Svalova V. B., Zaalishvili V. B., Ganapathy G. P., et al. Complex Environmental Monitoring in Russia and India. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2019. Vol. 9. No.4. pp. 87–101. DOI 10.23671/VNC.2019.4.44491. EDN TEBPHV.

20. Pazar R., Prishchepov A.V., Myachina K., Verburg P.H., Levykin S., Ponkina E.V., Kazachkov G., Yakovlev I., Akhmetov R., Rogova N., Bürgi M. Restoring steppe landscapes: patterns, drivers and implications in Russia's steppes. *Landscape Ecology*. 2021. Vol. 36. pp. 407–425. DOI: 10.1007/s10980-020-01174-7

21. Kraemer R., Prishchepov A.V., Muller D., Kuemmerle T., Radeloff V.C., Dara A., Terkhov A., Fruhauf M. Long-term agricultural land-cover change and potential for cropland expansion in the former Virgin Lands area of Kazakhstan. *Environmental Research Letters*. 2015. Vol. 10(5). 054012. DOI: 10.1088/1748-9326/10/5/054012

22. Moon D. *The Plough that Broke the Steppes*. Oxford University Press, Oxford. 2013. 319 p.

23. Ellis E.C., Klein Goldewijk K., Siebert S., Lightman D., Raman-kutty N. Anthropogenic transformation biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography*, (Global Ecol. Biogeogr.). 2010. No.19. pp. 589–606. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x